

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Měření životnosti ložisek na elektromotorech**

**Durability Measurement of Bearings on Electric Motors**

Student:

František Škop

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. et. Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2012

## Zadání:

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání bakalářské práce

Student: **František Škop**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Specializace: 70 Strojírenská technologie  
Téma: **Měření životnosti ložisek na elektromotorech**  
**Durability Measurement of Bearings on Electric Motors**

## Zásady pro vypracování:

1. Měření životnosti ložisek.
2. Montáž ložisek a elektromotoru.
3. Měření a zpracování dat.
4. Zhodnocení naměřených dat.
5. Závěr.

## Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v tryskovom obrábění*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] WHITNEY, Daniel E. *Mechanical Assemblies : Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2004. 518. p. ISBN 0-19-515782-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty



### Místopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 17.5.2012 .....

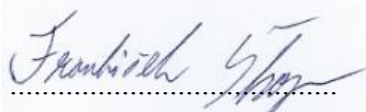
Podpis studenta .....  .....



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 17.5.2012



podpis

Jméno a příjmení autora práce: František Škop

Adresa trvalého pobytu autora práce: Loštice, Kašparova 435/12



## Obsah

Seznam použitého značení.....	7
Úvod .....	8
1. Měření životnosti valivých ložisek.....	10
1.1 Diagnostika stavu valivých ložisek .....	12
1.2 Vliv provozní teploty na životnost ložisek.....	13
1.3 Poruchy ložisek.....	14
1.4 Přednosti a nevýhody valivých ložisek .....	18
1.5 Montáž ložisek .....	20
1.6 Mazání valivých ložisek .....	22
1.7 Obsluha ložisek v provozu.....	23
1.8 Valivá ložiska jako strojní součásti .....	24
1.9 Základní typy valivých ložisek používaných na elektromotorech .....	25
2. Praktická část bakalářské práce .....	27
2.1 Montáž elektromotoru .....	28
2.2 Použitá ložiska .....	31
2.3 Vibrační zkouška .....	33
2.4 Hluková zkouška.....	38
2.5 Provedení životností zkoušky .....	46
3. Zhodnocení stavu valivých ložisek .....	48
3.1 Zhodnocení ceny ložisek .....	50
Závěr bakalářské práce .....	52
Poděkování.....	54
Seznam použité literatury .....	55



## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ŠKOP, F. *Měření životnosti ložisek na elektromotorech: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, 56 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Bakalářská práce se zabývá kompletním rozбором životnostních zkoušek valivých ložisek prováděných na elektromotorech vyráběných společností Siemens elektromotory o.z. Mohelnice. V první části bude uvedeno především rozdělení základních druhů valivých ložisek a druhů ložisek, u kterých bude prováděno měření jejich životnosti, a to společně se všeobecnými vlastnostmi ložisek jako je jejich životnost podmínky provozu atd. V další části práce budou uvedeny typy ložisek, které se montují na dané druhy měřených elektromotorů a celkový rozbor postupu montáže elektromotoru. V závěrečné části bude uveden návrh měření, vykonané zkoušky, jejich rozbor a celkové vyhodnocení naměřených dat.

## ANOTATION OF BACHELOR THESIS

ŠKOP, F. *Durability Measurement of Bearings on Electric Motors* Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2012, 56 p. Thesis supervisor: Petrů, J.

The bachelor thesis deals with the complete analysis endurance test roller bearings performed on electric motors produced company Siemens electro motors o.z. Mohelnice. In the first part will be stated primarily classification of the basic types roller bearings and types bearings, where measurements will be performed their lifetime, and together with general properties bearings as their lifetime operating conditions etc. In next part thesis will be stated types bearings, which are installed on the species measurement electric motors and overall analysis procedure assembly electric motors. In the final part will be stated proposal measurement, performed tests, their analysis and total evaluation of measured data.

## Seznam použitého značení

Označení	Význam	Jednotky
$F_Q$	radiální síla	N
HRC	tvrdost podle Rockwella	-
$L_{pf}$	hladina akustického tlaku	dB (A)
$L_{pf,celk}$	celková hladina akustického tlaku	dB (A)
$L_w$	hladina akustického výkonu	dB (A)
$L_{w,celk}$	celková hladina akustického výkonu	dB (A)
S	měřicí plocha	$m^2$
W	referenční akustický výkon	W
$W_0$	sledovaný akustický výkon	W
$a_{eff}$	zrychlení	$m/s^2$
p	akustický tlak	Pa
$s_{eff}$	výchylka	$\mu m$
v	akustická rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$v_{eff}$	rychlost	m/s
$x_{max}$	maximální efektivní hodnota rychlosti	mm/s
$x_{max}$	maximální efektivní hodnota výchylky	$\mu m$
$x_{max}$	maximální efektivní hodnota zrychlení	$m/s^2$
$x_{min}$	minimální efektivní hodnota rychlosti	mm/s
$x_{min}$	minimální efektivní hodnota výchylky	$\mu m$
$x_{min}$	minimální efektivní hodnota zrychlení	$m/s^2$

## Úvod

V dnešní ekonomicky i ekologicky náročné společnosti je na výrobce strojů a zařízení kladen velký důraz na snižování výrobních nákladů a s tím související hledání levnějších dodavatelů komponentů do výroby, u kterých je ale požadována vysoká kvalita dodávaných komponentů. Tuto kvalitu si mnozí výrobci ověřují zkouškami životnosti, v níž se snaží simulováním podmínek v náročném provozu prokázat životnost komponentů, aby byly splněny podmínky výrobce v oblasti kvality.

Bakalářská práce se zabývá měřením životnosti ložisek na elektromotorech společnosti Siemens. Veškerá měření budou prováděna ve společnosti Siemens elektromotory o.z. Mohelnice, který se zabývá výrobou a vývojem asynchronních elektromotorů s kotvou na krátko v osových výškách 63 mm až 200 mm v různých provedeních a specifikacích, které požadují zákazníci. V současné době se přešlo plně na výrobu tzv. zelených motorů, které mají vyšší účinnost a nižší spotřebu elektrické energie. Toho je dosaženo výrobou rotorů v kombinaci mědi a hliníku, což zvyšuje veškeré náklady na výrobu a konečnou cenu pro zákazníka, proto se výrobce snaží hledat levnější komponenty a za tímto účelem bylo v Mohelnici zbudováno nové výzkumné a vývojové centrum za podpory fondů EU. Na tomto novém pracovišti se budou provádět veškeré zkoušky, které budou obsaženy v této práci.

Naše měření budeme provádět na elektromotorech řady 1LE v osových výškách 100 mm a kuličkových ložiscích od dvou různých dodavatelů SKF a ORS BEARINGS (Turecko), kdy se budeme snažit prokázat životnost a vhodnost levnějších ložisek do výroby elektromotorů. Životnost ložisek budeme prokazovat třemi různými zkouškami. První zkouškou, kterou se bude provádět, je zkouška vibrační. Tuto zkoušku budeme provádět dle normy ČSN EN 60034-14, měření vibrací je prováděno na 6 místech elektromotoru měření budeme provádět z důvodu zjištění nevyváženosti rotoru a možných vad ložiska. Měření vibrací je velmi vhodnou metodou prokázání provozního stavu ložiska a celého elektromotoru. Další zkoušku, která se bude realizovat, bude zkouška hluková. Tato zkouška bude prováděna v uzavřené hlukové komoře, kde můžeme přesně zjistit hlučnost celého elektromotoru pomocí mikrofónů zaznamenávajících intenzitu hluku v decibelech. Třetí a poslední zkoušku, která se bude provádět, je samotné zjištění životnosti ložisek elektromotoru. Tato zkouška se provádí zavěšením závaží o hmotnosti 87 kg na konec hřídele.





Pro správnou funkčnost ložiska v elektromotoru je důležitá jeho samotná montáž na hřídel s rotorem, kde je pro nás důležité především správné nahřátí ložiska v indukční peci a tím roztažení ložiskového kroužku, čímž jde ložisko jednoduše nasadit pouhou rukou na hřídel s rotorem. Pro provádění životnostních zkoušek je důležitá přesnost výroby jednotlivých komponentů elektromotoru, kterou si před provedením zkoušek musíme ověřit pomocí mechanického měření nejdůležitějších bodů, což jsou pro nás průměr statoru, rotoru, díry pro ložisko ve štítu a průměr hřídele pod ložiskem. Výsledky všech měření budou využity pro určení vhodnosti použití levnějších ložisek.



## 1. Měření životnosti valivých ložisek

Životností ložiska je myšlena vlastnost ložiska plnit námi požadované funkce do dosažení některého z jeho mezních stavů.[1]

Mezními stavy se rozumí:[1]

- zvýšenou hlučnost chodu ložiska;
- roztržení ložiskové klece;
- prasknutí kroužku ložiska;
- prasknutí valivého tělesa;
- zadření ložiska;
- překročení provozní teploty;

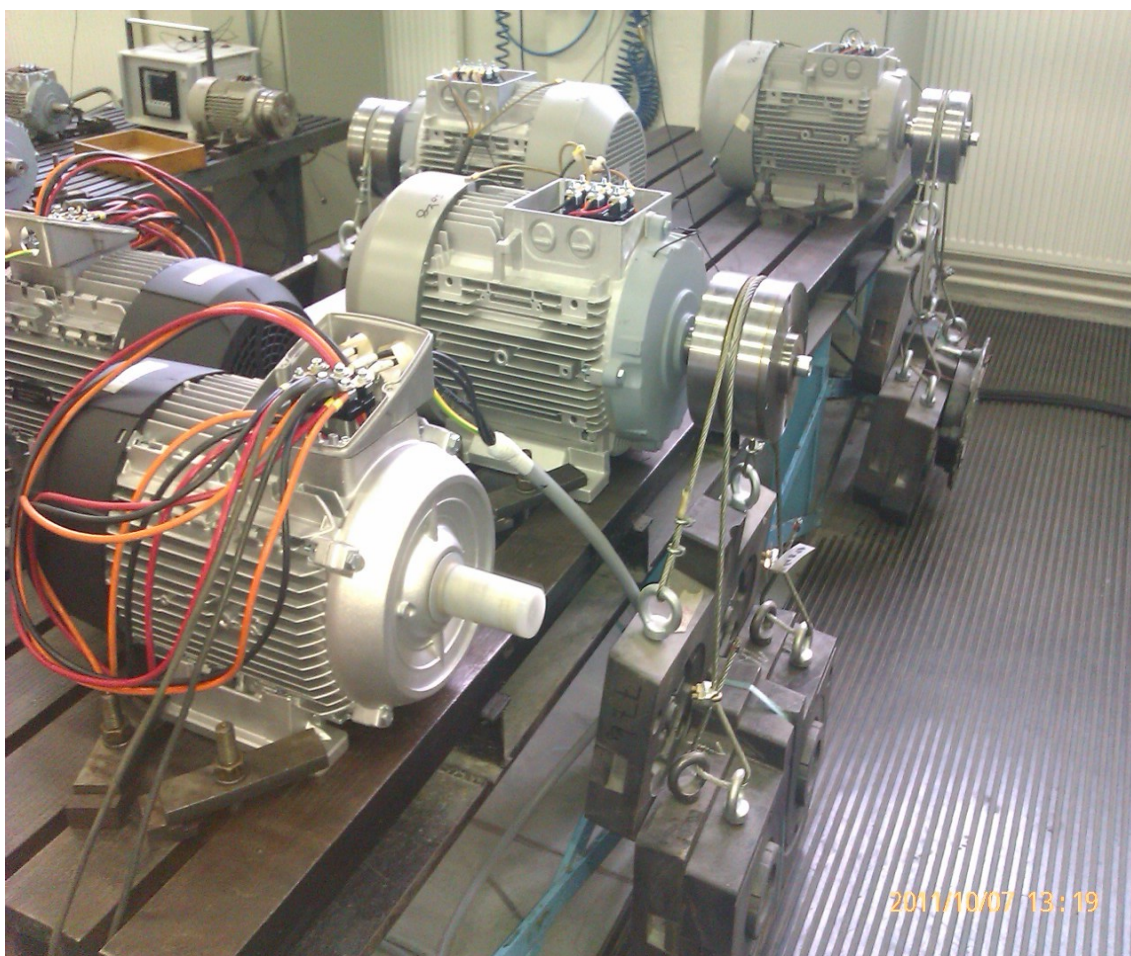
K výše uvedeným mezním stavům ložiska dochází především z důvodů montážních chyb, chyb způsobených již samotnou výrobou ložiska, příliš náročných podmínek provoz, nedostatečného mazání, vydření valivých ploch, zvýšených vibrací atd. Takto nelze životnost ložiska předem určit žádným výpočtem.[1]

Doba provozu ložiska se zpravidla vyjadřuje v hodinách nebo počtu otáček, než dojde k porušení ložiska do takové míry, že přestane vyhovovat požadavkům na uložení a musí být vyřazeno. Tento stav nazýváme technickým životem – pod pojmem technický život zahrnujeme trvanlivost valivého ložiska, a to jako trvanlivost početní nebo trvanlivost skutečnou.[1]

Trvanlivostí skutečnou rozumíme délku chodu ložiska za provozních podmínek v daném zařízení do vzniku doličkovitého opotřebení tzv. pittingu. Pitting je kontaktní únavové odlupování materiálu na některé z valivých ploch, vyjadřuje se celkovým součtem provozních hodin při otáčkové frekvenci nebo celkovými otáčkami. Trvanlivost ložiska nelze předem určit. Samotná trvanlivost se může odlišovat i při použití stejných typů ložisek a to i za stejných provozních podmínek v tomto případě hraje velkou roli celková kvalita výroby ložiska, použité materiály i kvalita mazacích tuků a správná montáž ložiska na hřídeli. I mezi samotnými ložisky od stejného výrobce mohou nastat velké rozptyly v trvanlivosti, kdy je

možné, že samotné ložisko bude mít několikanásobně nižší trvanlivost než ložisko s trvanlivostí nejlepší. Vzhledem k těmto výrazně rozdílným vlastnostem nám slouží tzv. trvanlivostní výpočet. [1]

Trvanlivost je zjišťována experimentálně na měřicí stanici, kde ložiska jsou podrobována zkouškám do dosažení jejich mezních stavů. Tento stav se může projevat buďto zvýšenou hlučností, vibracemi anebo samotným zadřením ložiska způsobeným již velkým opotřebením ložiskové pánve tzv. pittingu. Trvanlivost provádíme na více zkušebních vzorcích, díky kterým nejlépe prokážeme trvanlivost daného ložiska, protože i samotná ložiska od jednoho výrobce se mohou velmi odlišovat.[1]



*Obr. 1 – Měření životnosti ložisek prováděných na zkušebních vzorcích v tomto případě elektromotorech, kde porovnáváme ložiska od dvou rozdílných výrobců SKF a ORS BEARINGS (Turecko).*

## 1.1 Diagnostika stavu valivých ložisek

Pro vyhodnocování stavu valivých ložisek lze užívat mnoha různých metod. Za nejjednodušší lze považovat měření teploty ložiska. Nedostatkem u této metody je to, že teplota v ložisku narůstá až při velmi výrazném opotřebení ložiska, kdy velmi vzrůstá pravděpodobnost vyřazení ložiska z provozu a tím následného odstavení stroje. Další možnou analýzou stavu ložiska je analýza maziva. Jde o velmi sofistikovaný postup hodnocení stavu ložiska. V případě, jestliže dochází k postupujícímu poškozování ložiska vznikají na oběhových drahách ložiskových kroužků větší a větší trhlinky, z nichž kovové části pronikají do maziva. V mazivu jsou kovové části uchyceny a odebráním maziva je vyhodnoceno jejich množství, které je přímo úměrné opotřebení ložiska. Čím více kovových částí v mazivu je, tím horší je stav ložiska a je nutná jeho co nejrychlejší výměna. Další možností zjištění provozního stavu ložiska je analýza olejů. Jedná se o velmi vhodnou metodu, která poskytuje rychlé informace o opotřebení ložiska. Ovšem pokud nás zajímá příčina vzniku opotřebení, analýza oleje není schopna tuto informaci podat. Může nastat i případ, kdy je olej znečištěný již sám o sobě vlivem nečistot.[2] [3]

Jednou z dalších možností jak hodnotit provozní stav ložiska je měření vibrací. Tato metoda je komplexní, jelikož nám umožňuje zjistit několik různých stavů a to ložiska i provozních stavů daného stroje. Vibrační zkouška nám umožňuje zjistit nejen provozní stav ložiska a s tím související jeho opotřebení ale i poruchové stavy stroje jako jsou nesouosost, nevyváženost (rotoru), mechanické uvolnění atd. tyto vlivy mají na provozní stav ložiska velmi významný vliv. Vibrační zkouška nám umožňuje udržovat stroje a zařízení v co nejlepší kondici, který nám přináší výhodu dlouhodobého provozu, aniž bychom museli do stroje jakkoliv zasahovat a provádět jeho údržbu. Jiné metody jako například analýza olejů a termografie jsou používány spíše jen jako podpůrné. Velkou výhodou vibrační zkoušky je, že nás informuje o poruše ložiska v dostatečném předstihu, čímž předcházíme vyřazení stroje. Ovšem pokud je zřejmé z vibrační zkoušky, že ložisko je špatné, není hned nutné ložisko měnit, ale je vhodné vyhodnotit dobu, rozsah a celkově si naplánovat potřebné opravy, aby odstávka stroje nebyla příliš citelným zásahem do provozu podniku.[2] [3]

## 1.2 Vliv provozní teploty na životnost ložisek

Rozsah platnosti rovnice trvanlivosti má určitá omezení a to jak při malém a velkém zatížení, tak při nízké a vysoké rychlosti otáčení a také při překračování mezní teploty, příslušné k materiálu ložisek a užitému mazivu. [1]

Ložiska, která jsou vyráběna z ložiskových ocelí například oceli 14123, 14109 a s tím souvisejícím obvyklým tepelným zpracováním pokud u takovýchto ložiskových materiálů překročí teplota 100°C dochází ke snižování tvrdosti kroužků a valivých těles, čímž dochází ke snižování únosnosti ložiska, kdy v tomto případě se nejvíce poškozuje vnitřní ložiskový kroužek, který z důvodu horšího odvodu tepla se zahřívá více než valivá tělesa v ložisku a vnější kroužek ložiska. Při překročení mezní teploty může dojít i k trvalým rozměrovým změnám způsobených vlivem strukturálních změn v materiálu. Změny rozměrů mohou vést k poruchám ložiska, které mohou způsobit například uvolnění kroužku, změnu radiální vůle atd. Předějit tomuto můžeme ložisky se zvláštním tepelným zpracováním pro danou provozní teplotu, to platí v případě, pokud ložisko vyhovuje zmenšené únosnosti plynoucí z následující tabulky.[1]

*Tab. 1 Snižování únosnosti ložisek při mezních teplotách [1]*

Doplňkové označení	S00	S0	S1	S2	S3	S4
Mezní provozní teplota [ °C]	120	150	200	250	300	350
Součinitel únosnosti [-]	0,95	0,9	0,75	0,6	0,5	0,45

Důležitým faktorem pro spolehlivost ložiska při provozu za vysokých teplot je volba vhodného druhu maziva, které si udrží po námi požadovanou dobu své vlastnosti. Užití ložisek s většími vůlemi C3-C5, aby nedocházelo k vymezování vůlí teplotními dilatacemi.[1]

### 1.3 Poruchy ložisek

Valivá ložiska jsou někdy vyřazena z provozu z pravidla dříve, než je jejich vypočtený technický život. [1]

Do první kategorie poruch můžeme řadit například havárii ložisek, která může být způsobena například chybami provedenými při výrobě samotného ložiska. To může být nevhodná montáž, nevhodná mazací hmota, nečistoty atd., dále do této kategorie můžeme zařadit vady způsobené vadou materiálu a špatným tepelným zpracováním materiálu.[1]

Do skupiny poruch ložisek můžeme zařadit skončení životnosti ložiska vlivem nesprávného navržení nebo ložisko patří do skupiny statistického Q-kvantilu přípustných poruch ložiska. Toto hledisko je důležité znát obzvláště při velmi důležitých zkouškách prototypů strojů (elektromotorů) a nevykládat výsledky měření jednoho vadného ložiska. Toto ovšem nelze aplikovat, pokud nám jedno ložisko vyhovuje, proto musíme provést více zkoušek, aby byla prokázána vhodnost daných ložisek do výroby strojů a zařízení.[1]

Ložiska, která jsou vyráběna s větší rozměrovou a tvarovou přesností mají rovnoměrněji rozložené zatížení a z toho plynoucí výhodu maximálního namáhání a vyšší životnosti. Nízká drsnost povrchu kroužku zvyšuje životnost, která klesá při tvrdosti nižší než 60 HRC. Dalším faktorem, který nám ovlivňuje samotnou životnost, je válcovitost hřídele, na které je uchyceno ložisko a kolmost čela, na které ložisko dosedá. Pokud tyto dvě věci nejsou správně zhotoveny, tak dochází ke snížení životnosti ložiska a i k problematické montáži. Vhodnou konstrukcí uložení a správným umístěním podpor, správným vyvážením rotoru můžeme prodloužit životnost ložiska. Těmito opatřeními snižujeme síly, které působí na ložisko.[1]

Postupný konec životnosti ložiska lze indikovat různými způsoby, a to například objektivně, nebo pomocí přístrojů například vibrační a hlukovou zkouškou, nebo pokud má pracovník již dostatečné zkušenosti, lze životnost posoudit i samotným poslechem a hmatem.[1]

Faktory napovídající konec životnosti ložiska:[1]

- a) zvýšení provozní teploty ložiska;
- b) slyšitelná hluchost ložiska;



c) zvýšené chvění zařízení, v němž je ložisko namontováno;

Vysokým opotřebením ložisko ztrácí přesnost chodu i samotnou tuhost a v ložisku vznikají velké vůle. Mazivo může obsahovat kovový otěr, zpravidla jemný, také může mazivo obsahovat i třísky. Při vzrůstajícím třecím momentu může vzniknout zadření, zaklížení, čímž dojde k zablokování či zaseknutí ložiska.[1]

Hlavní příčiny vyřazení ložiska z provozu:

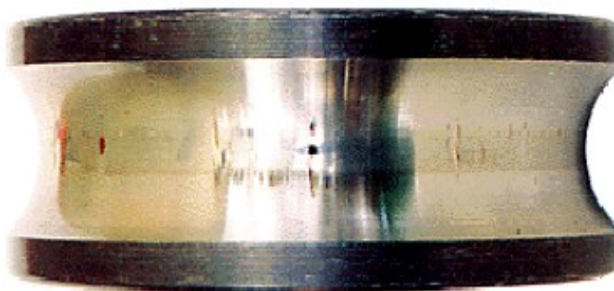
- Únavové odlupování materiálu z valivých ploch ložiska tzv. pitting. Pitting nám zvyšuje především chvění, teplotu a třecí moment v ložisku. Pitting má rychlý postup na plochách, kde je realizován bodový kontakt, při styku čárovém však nese dále plocha okolní. Pokud se dostanou vydrolené částice do valivého kontaktu tak dochází k poškození valivé plochy, čímž dojde k vymezení vůle a tak může dojít k zadření ložiska. Intenzivní otěr valivých ploch nám oddaluje vznik samotného pittingu z důvodu že neustále odstraňuje povrchové vrstvy, které vznikly při odvalování kuliček. Mazivo, které vniká do povrchových trhlin, působí v povrchových trhlinách při průchodu valivého tělesa velkým hydrostatickým tlakem, čímž se nám tlak zvětšuje. Výběr vhodného maziva má příznivý vliv na snížení teploty, zmenšení tření a otěru.[1]



*Obr. 2 Ukázka “pittingu” na kuličce ložiska [4]*

- Místní trvalé deformace valivých ploch, které jsou způsobena přetížením, které je bráno vzhledem ke statické únosnosti ložiska. Jejich vznik je často doprovázen chybnou montáží ložiska na hřídel příliš velkým lisovacím tlakem, kdy při lisování ložiska na hřídel se přenáší lisovací síla na valivá tělesa. Velmi podobné poškození vzniká zvláštním druhem vibrační oxidace, kdy je ložisko zatíženo a vystavěno chvění, čímž

mohou zůstat v ložisku i velmi hluboké otisky (nesprávné brinellování – falsebrinelling) valivých těles v oběžných drážkách. Pro ochranu ložisek stroje dopravujeme stroj s demontovanými ložisky, popřípadě ložiska můžeme odlehčit vypodložením rotoru. Dále mohou místní deformace vzniknout vniknutím tvrdých nečistot. [1]



Obr. 3 „False brinelling“ na vnitřním kroužku ložiska [4]

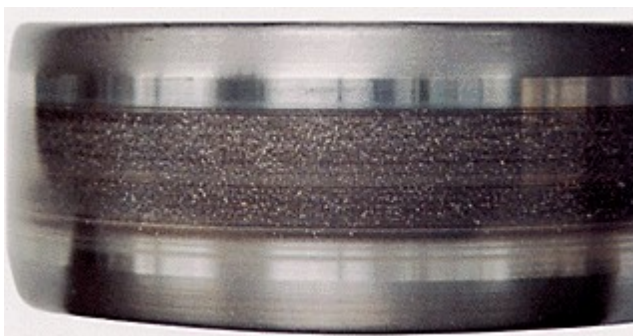
- Příliš velký vznik rýh, zadření a zbarvení oxidačních pruhů či pruhů vyhřátých značí nedostatečné či již žádné mazání ložiska, příliš velké tlaky. Tyto faktory mohou značit i příliš velké přetěžování ložiska, na které stroj nebyl dimenzován.[1]
- Trhliny a lomy částí ložiska jsou také velmi nebezpečné, jelikož mohou způsobit náhlé zničení ložiska. Jako příčinu lomu můžeme považovat přetížení ložiska, velké deformace ložiskového kroužku při přesahu na hřídeli, jako další příčinu lze uvažovat špatné tepelné zpracování materiálu kroužků. Lomu rázovým zatížením můžeme zabránit výrobou ložisek z cementační oceli s tvrdým jádrem a velmi houževnatým povrchem. Závadou, která se velmi často vyskytuje a je velmi nebezpečnou, je prasknutí klece při jejím oslabení otěrem, tlakem zadrhávajících valivých těles.[1]



Obr. 4 Trhliny na vnitřním kroužku ložiska [4]

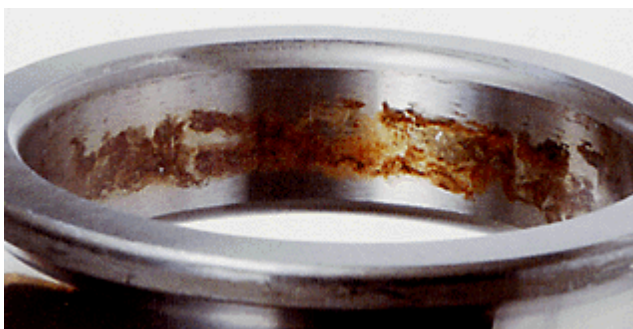


- Při velmi velkých zatíženích ložiska popřípadě vysokých rychlostech ložisek bez klece dochází k odírání valivých těles vzájemným stykem.[1]
- Prochází-li ložiskem proud o napětí, které je větší, než 0,5V dochází ve valivém kontaktu k jiskření, které prochází tenkou vrstvou maziva, které je v ložisku. Vinou tohoto jiskření vznikají krátery a někdy také může vznikat větší odtavení materiálu.[1]



Obr. 5 „Electrical Corrosion“ na vnitřním kroužku ložiska [4]

- Příliš velký otěr valivých částí ložiska způsobuje ztrátu přesnosti chodu ložiska, zvětšení vůle, tuhosti, chvění a hlučnosti, která může být slyšitelná již pouhým poslechem. Příliš velkým otěrem trpí především klec ložiska. Podle provozních podmínek, ve kterých ložisko pracuje, může převažovat některý z druhů opotřebení, který má zásadní vliv na životnost ložiska. [1]
- Poškození ložiska nemusí být vždy uvnitř, ale může se projevovat i na jeho povrchu. Vnitřní kroužek, který je zatížen na obvodu větší radiální silou a současně je na hřídeli uložen s velmi malým přesahem může u takto umístěného ložiska docházet s postupujícím otěrem k jeho uvolnění. Dále na kroužcích ložiska může vznikat při malých pohybech ložiska na hřídeli tzv. styková koroze.[1]



Obr. 6 „Fretting“ na vnitřním kroužku ložiska [4]



#### 1.4 Přednosti a nevýhody valivých ložisek

Všeobecně nelze dávat přednost valivým ložiskům před ložisky kluznými ani toto nelze praktikovat opačně. Oba druhy ložisek mají svoje určité nezaměnitelné vlastnosti, které se nám mohou uplatnit za určitých provozních podmínek a to více či méně. Velmi často je obtížné se rozhodnout, kterému z těchto druhů ložisek dát přednost či ne. Proto jsou velmi důležité znalosti jejich specifických vlastností a správná volba ložiska může mít velký vliv z hlediska ekonomického, které je pro nás v dnešní době velmi důležité a také z hlediska technického, a to především z důvodu vhodnosti pro daný typ strojího zařízení. Ve skutečnosti lze vhodnost daného typu ložiska zhodnotit jen tak, jak se uživateli a konstruktérovi zařízení jeví za podmínek běžného provozu. Toto naopak neplatí pro podmínky, kdy zařízení pracuje ve velmi extrémních podmínkách. Za extrémní podmínky provozu můžeme považovat například přetěžování hřídelů, příliš vysoké otáčky potažmo prostředí, ve kterém je zařízení provozováno.[1]

Hlavní přednosti valivých ložisek: [1]

- Valivá ložiska mají nízký třecí moment, z tohoto důvodu vyvíjejí málo tepla, pracují za nižších teplot bez potřeby chlazení a jsou schopna vyšších výkonů.
- Stroje, které používají valivá ložiska mají dobrou mechanickou účinnost.
- Tření při rozběhu u valivých ložisek je stejné jako za chodu, malý třecí moment nezvyšuje rozběhový moment ložiska.
- Valivá ložiska mohou být plně zatížena jak při rozběhu tak i doběhu i za klidu.
- Valivá ložiska nevyžadují záběh, z tohoto důvodu mohou být ihned po montáži plně zatížena. Výjimkou jsou pouze značně zatížená ložiska při velmi vysokých rychlostech a axiální soudečková ložiska.
- Valivá ložiska mají vyšší odolnost proti zadření i při delším vynechání mazání.
- Valivá ložiska mají snadné konstrukční řešení pro přenos sil v libovolně působícím směru.



- Valivá ložiska mají schopnost pracovat při velmi vysokých provozních teplotách, toho jsou schopny především ložiska určená pro práci v takovém provozu.
- Valivá ložiska mají většinou malou, popřípadě nepatrnou spotřebu maziva. Ložiska v elektromotoru pracují po celou dobu životnosti pouze na jednu jedinou náplň maziva. Výměna ložiska v tomto případě je předepsána výrobcem elektromotoru, zpravidla jsou to 2 roky.
- Snadná montáž ložisek.
- Snadná údržba ložisek za provozu.
- Jednoduchá výměna ložiska, jelikož ložiska mají normalizované rozměry, které můžeme snadno vyhledat.
- Výhodou valivých ložisek je, že mají menší osové délky oproti ložiskům kluzným.
- Valivá ložiska běžných typů a velikostí jsou vyráběna ve velkých sériích a jsou levná.

#### Nevýhody valivých ložisek:[1]

- Valivá ložiska mají větší průměry oproti ložiskům kluzným a zpravidla i větší hmotnost, kterou způsobuje užití klece a kuliček popřípadě jehel, soudečků atd.
- Aby valivá ložiska mohla dosahovat tichého chodu srovnatelného s ložisky kluznými, musí být velmi přesně vyrobena.
- U valivých ložisek vlivem velkého kontaktního napětí je omezen technický život ložiska.
- Valivá ložiska, která jsou vyráběna v malých počtech a ložiska na zakázku mají vysokou cenu.



## 1.5 Montáž ložisek

Jedním ze základních pravidel pro montáž ložisek na volný konec hřídele je, aby montážní síla, která působí na ložisko, se nepřenášela na valivá tělesa v ložisku. [1][5]

Ložiska můžeme montovat:

a) za studena;

b) za tepla;

Montáž ložisek za studena probíhá především lisováním za studena. Pro nalisování ložiska za studena je zapotřebí velkých sil, které mohou překročit statickou únosnost daného ložiska a tím může dojít k poškození valivé dráhy ložiska. Z tohoto důvodu při lisování vnitřního kroužku na volný konec hřídele může montážní tlak lisu působit pouze na čelo vnitřního kroužku. Podobného postupu musíme využívat i při demontáži daného ložiska z hřídele, pokud nemá dojít k poškození ložiska a konce hřídele, poněvadž ložisko zpravidla vylišováváme jen z důvodu jeho poškození, musíme dbát především na neporušení hřídele. [1][5]

Při montáži velkých ložisek na hřídel je vyžadována velká montážní (lisovací) síla, proto u takto velkých ložisek je vhodnější jejich montáž za tepla, čímž dojde k roztažení materiálu ložiska a snadnějšímu nasunutí na hřídel, při tomto způsobu se ložiska nahřívají na cca. 90°C například v elektrické peci, které dodávají přímo výrobci ložisek. Při montáži ložiska na hřídel musíme dbát toho, aby ložisko dosedlo svojí plochou na opěrnou plochu na hřídeli a aby nám nedošlo ke zkřížení ložiska a tím porušení broušeného průměru pod ložiskem. Jelikož montáž ložisek je jednou z posledních operací při montáži rotoru, musíme dbát na jeho montáž, jelikož všechna předešlá činnost by mohla přijít do ztracena. Při montáži elektromotorů se využívá především montáže ložisek za tepla. Velikost radiální vůle se po montáži u ložisek zmenší dle velikosti přesahu. [1][5]

Jako montážní pomůcku pro montáž ložiska na hřídel používáme montážního pouzdra, které se opírá o čelo vnitřního kroužku ložiska. Stejných montážních postupů použijeme při lisování, popřípadě narážení lisovacích pouzder, kterých využijeme u ložisek s kuželovou dírou. Vnější ložiskové kroužky jsou zpravidla vkládány suvně a z tohoto důvodu se snadno vkládají. Při uložení s přesahem užíváme montážního pouzdra, které je opřeno o ložisko. Montáž zvláště přesných uložení musíme provádět v prostředí velmi čistém

a bezprašném. Pro montáž přesných ložisek a seřizování vůle ložisek je zapotřebí velké zručnosti a zkušeností daného pracovníka, který tuto operaci provádí. Demontáž ložisek provádíme především pomocí stahováku, nebo nahřátím ložiska například pomocí horkovzdušné pistole, čímž dojde k roztažení vnitřního ložiskového kroužku a tím ložisko můžeme jednoduše sejmout z hřídele, aniž by došlo k jeho poškození. Tohoto způsobu využíváme především u ložisek menších průměrů, jelikož u velkých bychom nedosáhli stažení ložiska a mohli bychom poničit hřídel, která je pro nás cennější než již poškozené ložisko, které zpravidla lze jednoduše nahradit novým a neporušeným. Dále můžeme používat ručních stahováků potažmo stahováků hydraulických, těchto stahováků můžeme využít i u větších průměrů ložisek. [1][5]



*Obr. 7 Stahování ložiska z hřídele elektromotoru*





## 1.6 Mazání valivých ložisek

Mazání ložisek se zaměřuje především na kluzné tření. Pokud ložiska nejsou mazána zahřívají se a tím dochází ke zkracování jejich životnosti. V konečném výsledku může dojít k jejich destrukci, čímž je nutno ložisko nahradit novým. Některá málo zatížená ložiska pracující malými rychlostmi mohou fungovat bez potřeby maziva, ovšem veškerá ložiska potřebují ke svoji životnosti aspoň malé množství maziva. Jestliže jsou ložiska za chodu mazána proudem oleje, jedná se o chlazení ložiska, aby nedocházelo k přehřívání a tím k místním trvalým deformacím. [1][6]

Ložiska jsou ve většině případů mazány plastickým mazivem, které nemůžeme brát jako věčnou, poněvadž mazivo postupem času degraduje a přichází o svoje vlastnosti, které jsou pro nás důležité, proto výrobci ložisek popřípadě výrobci zařízení určují dobu, za kterou musí být mazivo vyměněno, aby byla zajištěna funkčnost zařízení. Doba výměny maziva se může měnit v závislosti na frekvenci otáček a na prostředí, ve kterém je stroj používán, proto výrobci určují pro určité specifické podmínky výměnu maziva. S tím dále souvisí výběr maziva pro prostředí, ve kterém bude dané zařízení používáno. Používá především maziv, která jsou založena na bázi minerálních olejů, v nichž jsou zahušťovadly kovová mýdla mastných kyselin. Správné množství maziva v ložisku má i význam proti vnikání nečistot z okolí, ovšem ložisko může být zaplněno maximálně ze 60% jinak nám roste třecí moment na ložisku a energetické ztráty jsou příliš velké. Při velmi náročných provozních podmínkách používáme mazání olejového.[1][6]

Maziva dělíme:

- Lithná maziva, jejichž bod skápnutí se pohybuje kolem 170 °C, vyznačují se malou změnou konzistence s rostoucí teplotou, chemickou stálostí odolností proti vodě a obsahem antikoročních látek. Jejich použití je vhodné do 110°C.[1]
- Vápenatá maziva, jejichž bod skápnutí se pohybuje mezi 75-95 °C a použitelnost za provozu je do 70 °C. Tato maziva jsou odolná proti mechanickému hnětení a dále jsou odolná proti vodě, chemicky však nejsou příliš stálá a z tohoto důvodu nejsou vhodná pro dlouhodobé použití.[1]
- Sodná maziva, jejichž bod skápnutí se pohybuje mezi 140-200 °C a použitelnost za provozu je do 100°C. Tyto maziva vytvářejí s vodou emulzi a větší množství vody



je může vyplavovat. Jsou chemicky stálá, a proto jsou vhodná pro dlouhodobé použití.[1]

- Speciální maziva, maziva syntetická se používají především pro vysoké tlaky a velké teploty. Jsou vhodné pro dlouhodobé jednorázové náplně u ložisek uzavřených oboustrannými kryty.[1]

### 1.7 Obsluha ložisek v provozu

Pokud jsou ložiska ve strojním zařízení správně dimenzována a správně namontována tak vyžadují za provozu jen kontrolu maziva a popřípadě jeho doplnění, jinak valivá ložiska nepotřebují žádnou zvláštní péči během jejich životnosti. V případě uložení, u kterých je požadována velká spolehlivost se doporučuje kontrolovat chvění pomocí vibračních zkoušek, které můžeme provádět i za provozu. Doporučuje se též kontrolovat provozní teplotu, ale v dnešní době se již spíše používá vibrační zkouška, ovšem pokud je kontrolována provozní teplota a teplota se zvyšuje, tak to značí blížící se konec technického života ložiska. I v případě malého únavového odlupování povrchových vrstev na valivých plochách kroužků ložiska je poměrně dobře slyšitelné poslechem, jelikož je dobře rozeznatelné svým velmi charakteristickým zvukem. I přítomnost kovového materiálu v mazivu ložiska vypovídá o velkém opotřebení valivých ploch ložiska a o brzkém konci života daného ložiska. Kontroly výše popsané lze zjišťovat za pomoci přístrojů k jednotlivým zkouškám určených. Tyto přístroje nám jsou schopny signalizovat mezní provozní stavy ložiska, zhoršení vlastností a tím blížící se konec ložiska. Za pomoci těchto přístrojů jsme schopni předem a zavčas připravit výměnu ložiska, čímž můžeme zabránit vzniku havárie a omezit ekonomický dopad na podnik v případě prostoje daného stroje a zařízení. Jelikož prostoje nejsou v žádném případě žádoucí, podnik tím přichází o nemalé peníze a zákazníky za pozdní dodávku zboží a proto nejvhodnějším způsobem diagnostiky ložisek za provozu je vibrační zkouška.[1]

Velmi dobrým příkladem nenáročnosti valivých ložisek na údržbu je uložení běžných druhů elektromotorů. Při mazání ložisek plastickým mazivem pracují válečková i kuličková ložiska na rotoru elektromotoru tři a možná i více roků za předpokladu ideálního provozu, ale výrobci elektromotorů např. firma Siemens doporučuje výměnu ložisek na elektromotorech s kotvou na krátko po dvou letech, abychom předcházeli případným haváriím, pokud jsou elektromotory příliš přetěžovány a používány v náročných podmínkách. Na elektromotorech



používáme ložiska s oboustrannými kryty a to typu 2Z nebo typu 2RS takto krytovaná ložiska mají zpravidla náplň na celou dobu jejich technického života. [1]

### 1.8 Valivá ložiska jako strojní součásti

Valivých ložisek se ve velkém užívá při hromadné výrobě rozličných druhů strojů a zařízení. Ložisek se užívá velké množství od různých výrobců, aby byla zaručena jejich vzájemná zaměnitelnost, proto jsou ložiska jako strojní součásti normalizovány. Jako normalizované prvky jsou na ložiscích často posuzovány vnější rozměry, které můžeme vyčíst z různých katalogů výrobců ložisek anebo strojních tabulek. Pro stavbu strojů je důležitá dimenzace jednotlivých částí a tím můžeme využít jednotlivých dobrých vlastností ložisek, k tomuto je ovšem potřeba znát veškeré vlastnosti ložisek. Základními částmi valivých ložisek jsou vnější kroužek, vnitřní, valivá tělesa a klec ložiska. Jako valivých těles v ložiscích se užívá kuliček, jehel, válečků, kuželíků a soudečků. Valivé segmenty v ložisku jsou rozděleny rovnoměrně po celém obvodu ložiska a za chodu ložiska jsou od sebe udržovány v určitých vzdálenostech a to pomocí klece, jež brání vzájemnému styku valivých segmentů. Klece v ložiscích jsou vyráběny lisováním z ocelového plechu, mají nízkou váhu a umožňují mazivu dobrý přístup do ložiska. Při potřebě robustní klece jsou klece soustružené popřípadě lité například z mosazi, ocele, litiny a různých lehkých kovů. Materiál klece volíme dle konstrukce, velikosti podmínek provozu, za kterých je ložisko provozováno. Klece ložisek jsou vedeny stykem s valivými segmenty, nebo mohou být středěny na vnějším potažmo vnitřním kroužku. U valivých ložisek je dále kladen velký důraz na přesnost jejich výroby, proto je požadována malá drsnost povrchu ložiska a z tohoto důvodu jsou ložiskové kroužky broušeny na bezhrotých bruskách. Valivé segmenty ložiska jsou vyráběny tím, že se nejprve stříhají z ocelového drátu a dále jsou lisovány do požadovaného tvaru, kdy po vylisování je další operací kalení, broušení a nakonec leštění valivých segmentů. [1]

Konstrukce valivých ložisek:

Ložiska jsou dělena především podle tvarů valivých segmentů, a to například kuliček, jehel, kuželíků, soudečků atd.[1]

Rozeznáváme dvě hlavní skupiny ložisek:

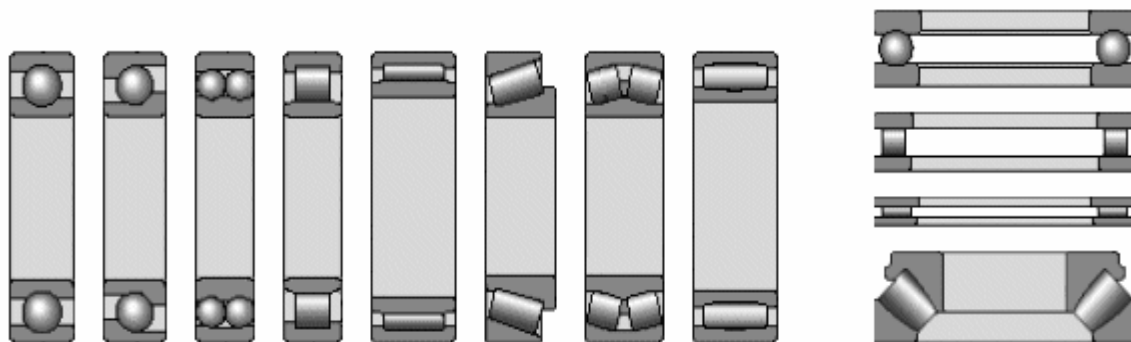
- Kuličková ložiska;
- Válečková ložiska;



Obě tyto skupiny dále dělíme na :

- Radiální ložiska;
- Axiální ložiska;

### 1.9 Základní typy valivých ložisek používaných na elektromotorech



Obr. 8 Základní druhy ložisek [7]

**Jednořadá kuličková ložiska** - jde o nejčastěji užívaná ložiska z několika důvodů, jelikož jsou tato ložiska poměrně levná, mají dobrou únosnost a to jak v radiálním směru, tak i ve směru axiálním z důvodu, že oběžné kroužky jsou poměrně hluboké a zabezpečují dobré přimknutí ke kuličce poloměr těchto drážek je asi jen o 4% větší než poloměr kuličky tak i tato ložiska mohou pracovat při velmi vysokých rychlostech, což je vhodné pro naši práci, kdy se zabýváme ložisky v elektromotorech, kde se mohou otáčet rychlostí až  $6000 \text{ min}^{-1}$ . [1][8]

Jednořadá kuličková ložiska nám výrobci dodávají v mnoha provedeních a to např. [1][8]

- S drážkou na vnějším kroužku pro pojistný kroužek takto dodávaná ložiska se označují písmenem N.
- S plastickým těsněním jednostranným těsněním označení RS s oboustranným 2RS.
- S kulovým vnějším kroužkem toto řešení umožňuje naklápění ložiska v kulovém sedle.
- S krycím plechem jednostranným označení Z s oboustranným označením 2Z, takto krytovaná jsou ložiska v elektromotorech, kde kryty brání úniku maziva do vinutí



a zároveň vnikání nečistot do ložiska. Takto chráněná ložiska jsou trvale mazána náplní maziva na celou dobu své životnosti.

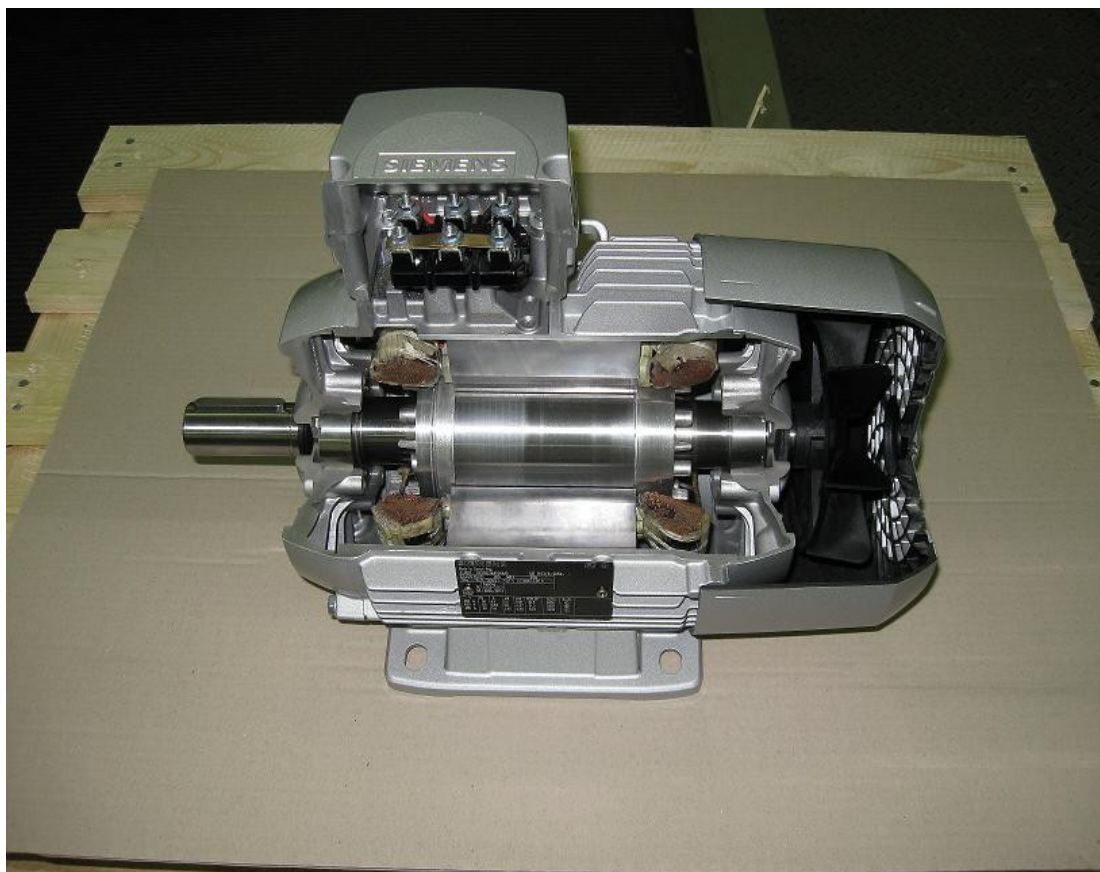
**Jednořadá kuličková ložiska rozebíratelná** - neboli také opěrná, tato ložiska pracují obdobně jako ložiska jednořadá kuličková s kosoúhlým stykem. Tato ložiska mají malou únosnost a vyrábějí se pouze v malých velikostech. Jejich výhodou je rozebíratelnost, kterou zaručuje dráha vnějšího kroužku přecházející na straně jedné do válcové části, čímž jedna příruba chybí a vnější kroužek se dá sejmut, což nám usnadňuje montáž.[1][8]

**Válečková ložiska** - jsou vyráběna v několika různých typech, které se liší především konstrukcí přírub kroužků, kdy alespoň vždy jeden z kroužků má obě příruby mezi kterými jsou vedeny válečky, kde klec udržuje válečky na přírubovém kroužku a to i za situace, kdy sejmeme volný kroužek. U válečkových ložisek je styk válečků s oběžnými dráhami výhodnější než u kuliček, z tohoto důvodu mají válečková ložiska větší únosnost v radiálním směru než ložiska kuličková stejné velikosti. Válečková ložiska mají stejně jako ložiska kuličková výhodu lehkého chodu a z tohoto důvodu jsou vhodná pro rychloběžná uložení s užitím masivní klece, která je vedena na přírubě jednoho kroužku a to nejlépe vnějšího, poněvadž jde zajistit dobré mazání vodících ploch. [1][8]

**Jehlová ložiska** - jsou to ložiska, které mají válečky s velkým poměrem délky ku jejich průměru. Tato ložiska se vyznačují zvláště velkou radiální únosností a tuhostí. V případě pokud jsou jehly příliš dlouhé, je obtížné zajistit jejich přesnost tvaru. Při takovýchto úchylnkách není odvalování dokonalé a jehly, které jsou zatížené a v ložiskách se přičí. Vedení jehel na přírubách je málo dokonalé na rozdíl od válečkových ložisek, z tohoto důvodu musí být během otáčení ložiska vždy určitá část jehel odlehčena, aby jehly byly schopny zaujmout správnou polohu. S tímto souvisí různé speciální konstrukce jehlových ložisek, které nám tento požadavek umožňují, poté mohou ložiska pracovat spolehlivě i při vysokých rychlostech a velkých zatíženích. Jehlová ložiska se vyrábějí s klecí nebo bez klece. Jehlová ložiska jsou především vhodná pro značně proměnlivé a nárazové zatížení a kývavý pohyb. [1][8]

## 2. Praktická část bakalářské práce

V praktické části bakalářské práce se budeme zabývat v první části montáží elektromotoru osově výšky 100 mm, která je důležitá pro samotné provedení námi požadovaných zkoušek, které dokáží prokázat dobré vlastnosti levnějších ložisek pro výrobu elektromotorů. Při montáži elektromotoru je pro nás důležitá přesnost výroby jednotlivých komponent rotoru, statoru, štítů a jiných, u kterých je nutné pro přípravu vzorku pro zkoušky provést měření, z výsledků měření průměru statoru a rotoru je nutné určit velikost vzduchové mezery mezi rotorem a statorem pro správnou účinnost elektromotoru. Druhou částí praktických zkoušek bude zkouška vibrační, která bude prováděna dle normy ČSN EN 60034-14, která určuje měření vibrací na pěti předem daných místech elektromotoru. Z vyhodnocení vibrační zkoušky poté můžeme určit správný chod ložisek. Třetí částí zkoušek bude zkouška hluková, kterou provedeme dle normy ČSN ISO 3745, zkouška bude prováděna v hlukové komoře, kde zapojený elektromotor bude snímat 10 mikrofónů rozmístěných kolem elektromotoru v takzvané polokouli. Poslední částí zkoušek bude zkouška životnostní, kterou budeme provádět zavěšením závaží na volný konec hřídele, které bude simulovat reálné podmínky provozu elektromotoru. V závěrečné části praktické části vyhodnotíme stav valivých ložisek po jejich podrobení životnostním zkouškám a zhodnotíme cenovou výhodnost levnějších ložisek v porovnání s dražšími. Veškeré měření budou prováděna ve společnosti Siemens elektromotory o. z. Mohelnice, která se zabývá výrobou elektromotorů v různých osových výškách od 56 mm do 200 mm v různých specifikacích, které si vyžádají zákazníci.



*Obr. 9 Elektromotor řady ILE v řezu*

## 2.1 Montáž elektromotoru

Pro montáž elektromotoru je nejdůležitější nákup všech komponent, dílů nebo již celých sestav potřebných pro jeho samotnou montáž. Jako komponenty, díly popřípadě celé sestavy rozumíme například navinutý svazek, který je již předem zalisován v kostře, kompletní sestava rotoru, 2 štíty, spojovací materiál (šrouby, matice, pero), ložiska. Pokud jsou již nakoupeny veškeré potřebné součásti mohou pracovníci přejít k celkové montáži elektromotoru. Veškerá montáž elektromotorů se řídí technologickým předpisem, který je pro nás směrodatný pro úspěšnou montáž elektromotoru. Hlavní část technologického předpisu nám popisuje jednotlivé montážní operace, ze kterých je poté sestaven kompletní montážní postup výroby daného elektromotoru, veškeré operace se seřazují dle toku jednotlivého materiálu na pracoviště montáže. Montáž elektromotorů se provádí na montážním dopravníku, na kterém se za pomoci válečkového řetězu pohybuje montážní podložka. Montážní podložky mohou mít různé velikosti v závislosti na velikosti elektromotoru. Uvolnění podložek provádí sám pracovník na jednotlivých pracovištích za pomoci pneumaticky ovládané zarážky a předzarážky. Na konci montážního pásu navazuje pás na

podvěsný dopravník, na který jsou za pomoci plošiny zavěšeny elektromotory a dále putují do stříkací komory, kde je na motory nanášena barva dle požadavku zákazníka. Po zaschnutí barvy putují dále elektromotory do expedice, kde jsou baleny a dále jsou odesílány k prodeji zákazníkům.[9]

Práce se bude zabývat montáží elektromotoru řady 1LE osově výšky 100 mm. Elektromotory řady 1LE jsou třífázové nízkonapěťové asynchronní elektromotory s rotorem na krátko. Tyto elektromotory je možno používat ve všech průmyslových odvětvích. Dále jsou vhodné pro použití v náročných podmínkách chemického a petrochemického průmyslu, ale také jsou vhodné pro použití v náročných klimatických podmínkách a to například v přímořských oblastech, v nichž je agresivní vzduch. Mohou také zahrnovat velké široké pole působnosti například čerpadla, kompresory, ventilátory, dopravní systémy, automatizace a pohony. Elektromotory řady 1LE také disponují možností použití po celém světě, jelikož mají velký rozsah jmenovitých napětí. Pro naše využití budeme využívat elektromotor dvou pólový, jehož výkon bude při zapojení do trojúhelníku a napětí 400 V a 50 Hz 3,0 kW při otáčkách  $2850 \text{ min}^{-1}$ , hmotnost motoru je 19 kg v základním provedení, kostra je vyrobena z tlakově odlitého hliníku. Pro potřeby provedení praktických zkoušek jsou veškeré vzorky elektromotorů kompletovány ručně. Pro ruční kompletaci elektromotorů je nutné dodržovat veškeré pokyny, které plynou z technického předpisu pro montáž. [10] [11]

Postup ruční montáže elektromotoru:

1- Po nahřátí hliníkové kostry elektromotoru v indukční peci na teplotu  $350^{\circ}\text{C}$  pomocí přípravku, ve kterém je usazen navinutý svazek, se hliníková kostra nasadí na navinutý svazek. U takto předem připravené komponenty kontrolujeme hodnotu zalisování svazku v hliníkové kostře, která je u našich vzorků 52 mm a 52,1 mm, kdy předepsaná hodnota je 52mm. Na závěr provlečeme kabely statoru do prostoru svorkovnice.

2-. Hřídel je nalisovaná do rotorového svazku pomocí lisovacího přípravku tak, že po potření tukem a pod tlakem 5MPa je zalisována do rotoru. Po lisování je třeba kontrolovat házivost, poté je hřídel s rotorem obroušena na místech průměru pod ložisky a na volném konci, dále je na soustruhu osoustružen rotor, po soustružení je hřídel s rotorem vyvážená, aby nedocházelo k nežádoucím vibracím.



3 – Montáž ložisek na hřídel elektromotoru provádíme tak, že ložiska jsou předem nahřata v indukční peci na teplotu 110°C a ručně nasazena na hřídel. Po vychladnutí ložisek zkontrolujeme házivost rotoru, jehož předepsaná hodnota je 0,03 mm a u volného konce hřídele je tato hodnota 0,02 mm. Při měření byly u prvního vzorku naměřeny hodnoty házivosti rotoru 0,01 mm a volného konce hřídele 0,01 mm, u druhého vzorku byly naměřeny stejné hodnoty.



*Obr. 10 Indukční pec pro nahřívání ložisek*

4 - Konečná montáž elektromotoru je provedena tak, že rotor vložíme do předem připraveného svazku s kostrou ze strany ventilátoru a přišroubujeme první štít, do kterého je vetřen mazací tuk na místech, kde budou ložiska. Takto připravený štít vsadíme na kostru elektromotru ze strany ventilátoru a přišroubujeme šrouby M8, které utáhneme momentovým klíčem na hodnotu 12 kpm. Druhý štít umístíme na místo volného konce hřídele stejným způsobem. Elektromotor otočíme a pomocí přípravku a hliníkové paličky naklepeme ventilátor na hřídel, nasadíme kryt ventilátoru, pomocí šroubu M5 přišroubujeme svorkovnici a na svorkové desky připojíme kabely ze statoru. Po odzkoušení elektromotoru na hlučnost



a souosost proudů přišroubujeme kryt svorkovnice a naklepeme na volný konec hřídele pero. Poslední operací bude povrchová úprava elektromotoru.

## 2.2 Použitá ložiska

Pro životnostní zkoušky ložisek byla zvolena ložiska od dvou výrobců. Jedním z výrobců je společnost SKF Group A. B., která je největším světovým dodavatelem valivých ložisek. Společnost SKF je držitelem certifikátu kvality ISO 9000 a ve světě zaměstnává celkem 38 748 zaměstnanců v 80 výrobních závodech. Použitá ložiska třídy SKF EXPLORER jsou nově navrženou třídou ložisek vyznačující se výrazně vylepšenými parametry v porovnání s ložisky základní řady, těchto parametrů bylo dosaženo poznatky z oblasti tribologie, vývoje materiálů a zlepšení jejich konstrukce a výroby. Ložiska řady Explorer se vyznačují především lepší jakostí použité ocele, specifickými postupy tepelného zpracování a zlepšení povrchu všech stykových ploch s ohledem na snížení tření, vibrací a hlučnosti. Dalšími ložisky pro naše zkoušky budou ložiska od tureckého výrobce ORS – Ortadoğu Rulman Sanayi ve Tic.A.Ş, která jsou standardními ložisky dodávanými do elektromotorů společnosti Siemens. Tato ložiska patří do kategorie levnějších ložisek, avšak jejich kvalita výroby je deklarována certifikátem ISO 9001, další vlastností těchto ložisek je nízká hlučnost a velká životnost, ale aby životnost mohla být správně prokázána, musí být zkoušky provedeny na více ložiscích. V následující tabulce budou porovnány naměřené hodnoty ložisek společně s jejich označením. Pro měření ložisek byl použit digitální mikrometr společnosti Mitutoyo s rozsahem 50-100 mm s kalibrací do července roku 2013. Ložisko společnosti ZVL SLOVAKIA a.s, bylo zvoleno z důvodu porovnání rozměrů s námi používanými ložisky.[12] [13]

Tab. 2 Porovnání rozměrů ložisek

Výrobce ložiska	SKF	ORS	ZVL
Označení	Explorer – 6206-2Z/C3 HT	620650 C3	6206-2ZR
Země původu	Itálie	Turecko	Slovensko
Vnější průměr ložiska [mm]	62,001	62,001	62,000
Vnitřní průměr ložiska [mm]	29,993	29,998	29,995
Tloušťka [mm]	15,970	15,972	15,949
Hmotnost [g]	204	195	201

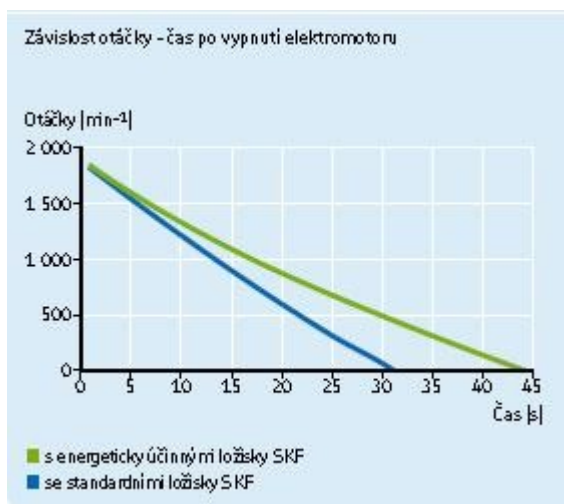


Obr. 11 Použitá ložiska vlevo SKF vpravo ORS

Pro použití v nových energeticky úsporných elektromotorech řady 1LA by bylo vhodné použít ložiska od společnosti SKF řady E2, tato ložiska jsou speciálně navržena s ohledem především na nízké tření, které je sníženo oproti standardním ložiskům sníženo až o 30%, což velkou měrou snižují spotřebu energií. Dále ložiska řady E2 nabízejí dvojnásobně delší provozní trvanlivost oproti ostatním ložiskům společnosti SKF. Klec těchto ložisek je vyráběna z kompozitního polymeru, který je zesílen za pomoci skelných vláken, klec je schopna odolávat vysokým teplotám. Ložiska řady E2 pro použití v elektromotorech jsou



oboustranně zakrytována ocelovým plechem a jejich volný prostor je zaplněn z 25 – 35% plastickým mazivem.[14]



Obr. 12 Diagram doběhu elektromotoru [14]



Obr. 13 Řez ložiskem SKF řady E2 [14]

### 2.3 Vibrační zkouška

Vibrační zkoušku budeme provádět dle normy ČSN EN 60034-14, ze které vyplývá, že měření vibrací by mělo být provedeno na 6 místech elektromotoru. Naše měření bude provedeno na 5 místech z důvodu, že 6. měřené místo je na místě ventilátoru, který bychom měli demontovat, ale demontovat jej nebudeme, jelikož ventilátor je součástí elektromotoru a vibrace by mohly být příliš zkresleny. Velikost vibrací na ložiscích elektromotoru je efektivní hodnotou širokopásmových vibrací při frekvenčním rozsahu od 10 Hz do 1000 Hz, výchylka vibrací je vyjádřena v mikrometrech, rychlost vibrací se vyjadřuje v milimetrech za sekundu a zrychlení vibrací v  $\text{m/s}^2$ . Zařízení pro měření vibrací by mělo být schopno zaznamenávat efektivní hodnotu širokopásmových vibrací v kmitočtovém rozsahu od 10 Hz do 1000 Hz, podle požadavků ISO 2954. Vibrace elektromotoru jsou úzce spjaty s jeho montáží, proto je nutné měřit vibrace přímo na elektromotoru za předem stanovených podmínek, které nám umožní opakovat zkoušky pro objektivnost měření. Pro naše měření bude použito pružné uložení na pěnové podložce, pružné uložení se používá pro otáčky zařízení od  $600 \text{ min}^{-1}$  do  $3600 \text{ min}^{-1}$ . Pro měření je dále důležité použít poloviční pero

(půlpero), kterým vyplníme drážku na konci hřídele, což je důležité pro měření, aby hřídel s rotorem byla vyvážená a nevznikaly nám nežádoucí vibrace. Elektromotor by měl být při vibrační zkoušce zkoušen naprázdno. Snímací zařízení a jeho montáž musí odpovídat specifikaci daného výrobce zařízení, proto je nutné, aby hmotnost snímače byla nižší než 1/50 hmotnosti elektromotoru. Nejvhodnější připevnění snímače je pomocí šroubu, požadavek na toto připevnění je dodržení kolmosti díry k povrchu zařízení a snímač musí být utažen předepsaným momentem za pomoci momentového klíče. Případné odchylky od správného způsobu upevnění mohou způsobit mechanické namáhání snímače a tím způsobit zkreslení výsledku našeho měření, což je nežádoucí. Toto spojení je výhodné z důvodu vysoké tuhosti a z hlediska vysokého rezonančního kmitočtu 15 – 30 kHz. V případě našeho měření budeme využívat připevnění snímače za pomoci červeného včelího vosku. Toto spojení čidla elektromotoru je výhodné z důvodu, že jsme schopni dosáhnout rezonancí na kmitočtech až 20 kHz, toto připevnění snímače ovšem není vhodně na místech, kde se vykytuje vysoká povrchová teplota elektromotoru, po sejmutí čidel je nutné povrch elektromotoru očistit od vosku například za pomoci organických rozpouštědel. Abychom neporušili povrch elektromotoru a mohli jej dále využívat, je možno připevnit snímače pomocí lepidel, toto připevnění ovšem závisí hodně na druhu a tvrdosti použitého lepidla.[15] [16]

Požadavky kladené na snímače [16]

- velký dynamický rozsah;
- široký kmitočtový rozsah;
- zanedbatelný rušivý účinek okolních vlivů (elektromagnetické pole, teplota, hluk aj.);
- stabilita v čase;
- velmi nízké zkreslení výstupního signálu;

V měření, kde je prováděno měření dvoupólového elektromotoru mají tyto motory velmi často na kmitočtu odpovídajícím dvojnásobku skluzového kmitočtu určité vibrační zázneje. Proto je nutné stanovit rozhodující velikost vibrací ze vztahu:[15]

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_{max}^2 + x_{min}^2}{2}}$$

V rovnici platí:[15]

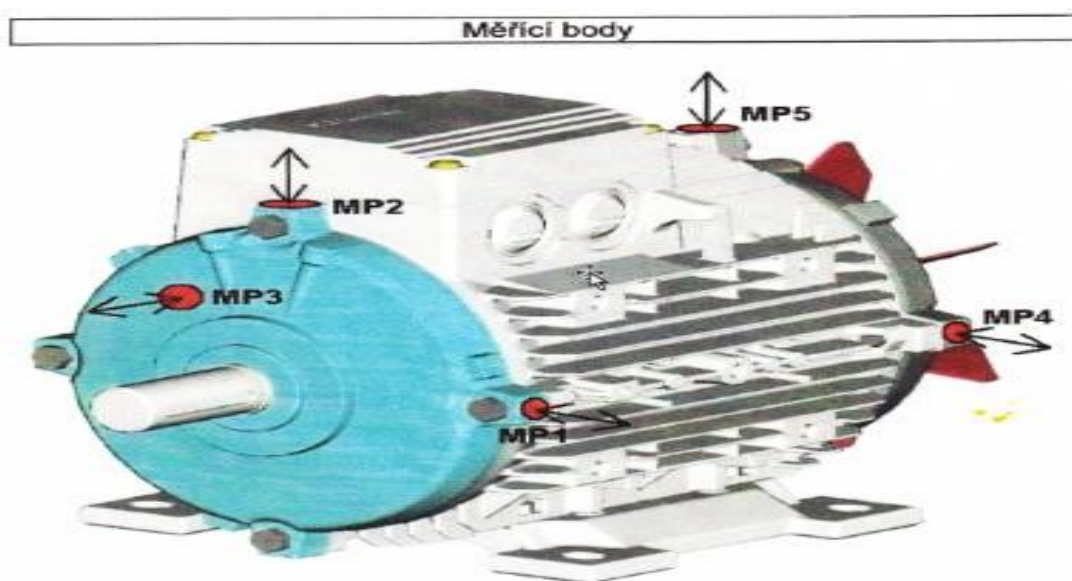
$x_{\max}$  – maximální efektivní hodnota rychlosti [mm/s], zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ] a výchylky [ $\mu\text{m}$ ]

$x_{\min}$  – minimální efektivní hodnota rychlosti[mm/s], zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ] a výchylky [ $\mu\text{m}$ ]

Měřicí zařízení: Bruel&Kjaer 2525, vyhodnocovací program ProTeam.



Obr. 14 Měřicí zařízení B&K 2525 s připevňovacím voskem červené barvy



Obr. 15 Měřicí body pro měření vibrací na elektromotoru [15]

Hodnoty pro vibrace dle normy ČSN jsou uvedeny v následující tabulce

Tab. 3 Hodnoty vibrací dle normy ČSN EN 60034-14 [16]

	Výška osy [mm]	$56 \leq H \leq 132$		
Stupeň vibrací	Uložení	Rychlost [mm/s]	Zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]
<b>B</b>	<b>Pružné uložení</b>	0,7	1,1	11

Výsledky měření vibrací elektromotoru s ložisky SKF EXPLORER 6206

Tab. 4 Výsledky vibrační zkoušky ložisek od společnosti SKF

Uložení	Rychlost $V_{\text{eff}}$ [mm/s]	Zrychlení $a_{\text{eff}}$ [ $\text{m/s}^2$ ]	Výchylka $s_{\text{eff}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Měřicí místo
<b>Pružné uložení</b>	0,22	0,25	4,2	1
	0,26	0,24	4,2	2
	0,22	0,41	4,2	3
	0,44	0,49	4,2	4
	0,30	0,56	4,2	5
<b>Hodnoty dle normy</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>11</b>	-

Z výsledků první zkoušky vyplývá, že ložiska od společnosti SKF v žádné z měřených hodnot nepřekračují hodnoty dané normou ČSN EN 60034-14.

## Výsledky měření vibrací elektromotoru s ložisky ORS

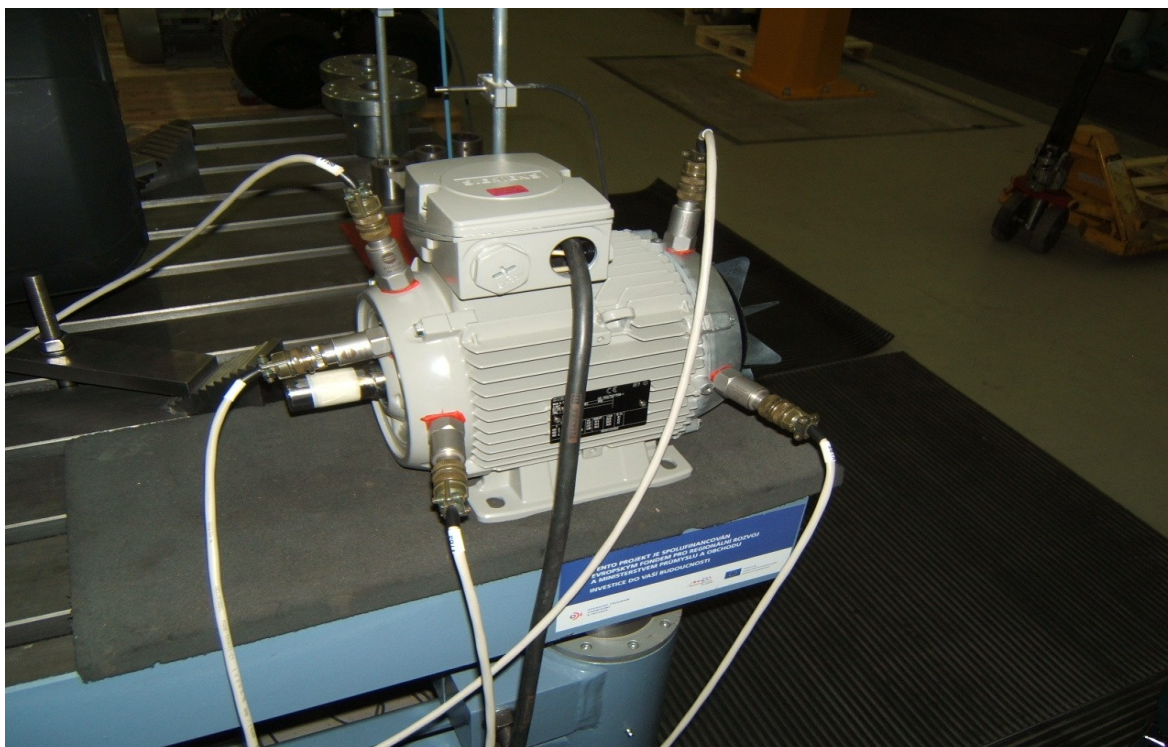
Tab. 5 Výsledky vibrační ložisek od společnosti ORS

<b>Uložení</b>	<b>Rychlost <math>V_{\text{eff}}</math> [mm/s]</b>	<b>Zrychlení <math>a_{\text{eff}}</math> [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>Výchylka <math>s_{\text{eff}}</math> [μm]</b>	<b>Měřicí místo</b>
<b>Pružné uložení</b>	0,27	0,32	4,8	1
	0,32	0,29	4,8	2
	0,30	0,50	4,8	3
	0,48	0,58	4,8	4
	0,34	0,68	4,8	5
<b>Hodnoty dle normy</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>11</b>	-

Z výsledků druhé zkoušky vyplývá, že ložiska od společnosti ORS v žádném z měřených hodnot nepřekračují hodnoty dané normou ČSN EN 60034-14.

Z výsledků obou provedených vibračních zkoušek vyplývá, že oba druhy ložisek splňují požadavky ve všech ohledech, které klade norma na vibrace elektromotoru. Měření elektromotorů bylo provedeno jednou za ustáleného stavu při napájecím napětí 400V/50Hz.





*Obr. 16 Měření vibrací na elektromotoru*

## 2.4 Hluková zkouška

Hluková zkouška bude provedena dle normy ČSN EN ISO 3745, což je norma pro akustiku, kterou se budeme řídit při vyhodnocování hlukové zkoušky, která bude provedena na dvou vzorcích elektromotoru řady 1LE osově výšky 100 mm. Měření bylo provedeno v hlukové komoře společnosti Siemens elektromotory o. z. Mohelnice. Měřenou hodnotou je hodnota akustického tlaku, což je efektivní hodnota okamžitého akustického tlaku v prostoru a je určena ve stanoveném intervalu. Hodnota akustického tlaku je vyjádřena v pascálech (Pa). Z hodnoty naměřeného tlaku se poté vypočítá hodnota hladiny akustického výkonu, která je vyjádřena v decibelech. Při měření mohou vznikat různé nejistoty, pokud je zdroj zvuku přemísťován mezi různými laboratořemi, kdy v každé z nich je určena jiná hladina akustického výkonu zdroje, který byl měřen v souladu s danou normou. Výsledky měření mohou vykazovat určité rozptyly. Směrodatné odchylky námi naměřených hladin je možné vypočítat dle normy ISO 7574-4:1985, tyto vypočtené hodnoty se mohou měnit s hodnotou frekvence. Přístroje pro měření hluku – systémy akustických přístrojů (mikrofony, kabely) musejí splňovat požadavky, které jsou kladeny na přístroje třídy 1 stanovené v normě IEC 61672-1:2002, i použité filtry musejí splňovat požadavky kladené na přístroje třídy 1, které



jsou stanoveny v normě IEC 61260:1995. Při každém měření musí být mikrofón zkontrolován akustickým kalibrátorem v našem měření kalibrátorem B&K 4231, který musí odpovídat přesnosti třídy 1, která je stanovena normou IEC 60942:2003, aby bylo možné ověření celého měřicího systému a to na jedné nebo více frekvencích námi sledovaného frekvenčního rozsahu. Kalibrátor je nutné také kalibrovat podle normy IEC 61672-1 a musí se ověřovat v návaznosti na daný etalon. Pro měření musíme použít přístroj pro určení atmosférického tlaku, který může mít nepřesnost rovnou nebo lepší než 2%, dále je nutné použít přístroj pro určení teploty, u kterého může být nejistota měření rovna nebo lepší než 1°C, jelikož teplota při měření se může pohybovat v rozmezí 15 - 30°C z důvodu, že při vyšších nebo nižších teplotách by mohlo dojít k ovlivnění měřených hodnot. Posledním přístrojem pro určení podmínek měření bude přístroj pro určení relativní vlhkosti okolí, u kterého může být nejistota měření rovna nebo lepší než 10%. Při měření hluku je důležité, jak je zkoušený zdroj instalován a dále provozován, což jsou faktory, které mohou mít významný vliv na akustický výkon, který je vyzařován zdrojem. Zdroj je nutné umístit v hlukové komoře tak, abychom zajistili dostatečný prostor, aby měřicí plocha mohla dokonale obklopit námi zkoušený zdroj. Hodnoty akustického výkonu budou záviset také na způsobu montáže zdroje hluku z důvodu, aby nebyly ovlivněny výsledky měření, proto je nutné provést veškerá opatření, která snižují vyzařování veškerého nežádoucího zvuku. Při montáži zdroje se musíme řídit všeobecně platnými předpisy pro montáž, proto zdroj hluku bude během měření umístěn na odrazivou plochu v našem případě na kovovou podložku, na kterou bude zdroj přišroubován a poté bude na podložku umístěna molitanová pěna. Během zkoušky bude zdroj provozován bez zatížení (chod naprázdno), proto je nutné předem stanovit zkušební podmínky, které musíme během zkoušky udržovat konstantně, proto je také nutné uvést zdroj do požadovaného stavu ještě před zahájením měření. Měření hladiny akustického tlaku bude provedeno v rozmezí 160-10000 Hz z důvodu, jelikož při hodnotách nad 10000 Hz dochází k atmosférickému útlumu, který by musel být kompenzován podle normy ISO 9613-1. Doba měření na každé frekvenci bude 30 sekund. Během hlukové zkoušky provádíme měření meteorologických podmínek, které jsou atmosférický tlak, teplota a vlhkost kolem měřeného zdroje, které je nutné udržovat na předem stanovených hodnotách. Zdroj hluku bude měřen v takzvané polokouli, která bude společně se zdrojem umístěna uprostřed místnosti, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků.

Měřenou hodnotou je hladina akustického tlaku, ze které je poté nutné určit hladinu akustického výkonu. Hladina akustického výkonu je spjata s postupující akustickou vlnou, která přenáší určitou energii. Je to množství energie, které projde za jednotku času plochou a je nazývána akustickým výkonem.[18]

Akustický výkon vyjadřuje vztah:[18]

$$W = pvS$$

Kde platí

$p$  – akustický tlak, který je vyjádřen v pascálech [Pa]

$v$  – akustická rychlost je vyjádřena v  $[m.s^{-1}]$

$S$  – měřená plocha, která je kolmá na zvukový paprsek je vyjádřena v  $[m^2]$

Hladinu akustického výkonu, která se vztahuje ke kmitočtu vyjadřuje vztah: [18]

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$$

Kde platí

$W$  – referenční akustický výkon, je vyjádřen [W]

$W_0$  – sledovaný akustický výkon, je vyjádřen [W]

Hodnota  $W_0$  se určí vztahem: [18]

$$W_0 = 10^{-12} W$$

Podmínky během měření hluku elektromotoru s ložisky SKF

Měření bude provedeno pomocí 10 mikrofónů B&K 4942, které jsou umístěny na takzvané polokouli. Jako analyzátor použijeme přístroj B&K PULSE 3560C a pro kalibraci všech přístrojů kalibrátor B&K 4231, calibration report No. 8012-KL-10325-10. Měření



provádíme na elektromotoru 1LE osově výšky 100 mm a provádíme ho jednou na každé frekvenci po dobu 30 sekund. Měření proběhne při 400V/50 Hz.

Otáčky elektromotoru	2895/min
Teplota	21,7°C
Tlak	99,50 kPa
Vlhkost	31,10%
Rosný bod	3,90°C

*Tab. 6 Měřené a vypočtené hodnoty hlukové zkoušky*

Hladina akustického tlaku		Hladina akustického výkonu	
Frekvence Hz	$L_{pf}(A)$ [dB]	Frekvence Hz	$L_w(A)$ [dB]
<b>100</b>	26,01	<b>100</b>	33,07
<b>125</b>	29,23	<b>125</b>	36,30
<b>160</b>	33,01	<b>160</b>	40,08
<b>200</b>	37,42	<b>200</b>	44,49
<b>250</b>	40,94	<b>250</b>	48,01
<b>315</b>	46,74	<b>315</b>	53,81
<b>400</b>	47,50	<b>400</b>	54,57
<b>500</b>	50,29	<b>500</b>	57,36
<b>630</b>	53,78	<b>630</b>	60,85
<b>800</b>	52,37	<b>800</b>	59,43

Hladina akustického tlaku		Hladina akustického výkonu	
Frekvence Hz	$L_{pf}(A)$ [dB]	Frekvence Hz	$L_w(A)$ [dB]
1000	55,10	1000	62,17
1250	55,88	1250	62,95
1600	51,18	1600	58,25
2000	54,07	2000	61,14
2500	54,81	2500	61,88
3150	54,32	3150	61,39
4000	50,06	4000	57,13
5000	46,66	5000	53,37
6300	44,57	6300	51,64
8000	41,77	8000	48,84
10000	35,62	10000	42,68

Výsledné hodnoty:

Tab. 7 Výsledky hlukové zkoušky elektromotoru provedené s ložisky SKF [19]

Celková hladina akustického tlaku	Celková hodnota akustického výkonu
$L_{pf,celk}(A)$ [dB]	$L_{w,celk}(A)$ [dB]
63,99	71,06
Maximální přípustná hodnota akustického tlaku [dB]	Maximální přípustná hodnota dle normy ČSN EN 60034-9 [dB]
75	82

Z výsledků první zkoušky vyplývá, že elektromotor s ložisky SKF, který byl měřen jednou v hlukové komoře splňuje požadavky normy.

#### Podmínky během měření hluku elektromotoru s ložisky ORS

Měření bude provedeno pomocí 10 mikrofónů B&K 4942, které jsou umístěny na takzvané polokouli. Jako analyzátor použijeme přístroj B&K PULSE 3560C a pro kalibraci všech přístrojů kalibrátor B&K 4231, calibration report No. 8012-KL-10325-10. Měření provádíme na elektromotoru 1LE osově výšky 100 mm a provádíme ho jednou na každé frekvenci po dobu 30 sekund. Měření proběhne při 400V/50 Hz.

Otáčky elektromotoru	2895/min
Teplota	21,7°C
Tlak	99,50 kPa
Vlhkost	31,10%
Rosný bod	3,90°C

*Tab. 6 Měřené a vypočtené hodnoty hlukové zkoušky*

Hladina akustického tlaku		Hladina akustického výkonu	
Frekvence Hz	$L_{pt}(A)$ [dB]	Frekvence Hz	$L_w(A)$ [dB]
100	29,28	100	36,35
125	33,22	125	40,29
160	38,61	160	45,67
200	42,67	200	49,74
250	45,02	250	52,08
315	52,97	315	60,04



Hladina akustického tlaku		Hladina akustického výkonu	
Frekvence Hz	$L_{pf}(A)$ [dB]	Frekvence Hz	$L_w (A)$ [dB]
400	53,11	400	60,18
500	55,58	500	62,64
630	57,51	630	64,58
800	55,30	800	62,36
1000	59,98	1000	67,04
1250	55,90	1250	62,97
1600	58,79	1600	65,85
2000	58,40	2000	65,46
2500	57,76	2500	64,82
3150	56,98	3150	64,04
4000	52,90	4000	59,96
5000	49,95	5000	57,02
6300	46,41	6300	53,48
8000	43,83	8000	50,90
10000	39,59	10000	46,65

Výsledné hodnoty:

Tab. 7 Výsledky hlukové zkoušky elektromotoru provedené s ložisky ORS [19]

Celková hladina akustického tlaku	Celková hodnota akustického výkonu
$L_{pf,celk}(A)$ [dB]	$L_{w,celk}(A)$ [dB]
67,80	74,87
Maximální přípustná hodnota akustického tlaku [dB]	Maximální přípustná hodnota dle normy ČSN EN 60034-9 [dB]
75	82

Z výsledků druhé zkoušky vyplývá, že elektromotor s ložisky ORS, který byl měřen jednou v hlukové komoře splňuje požadavky normy.



Obr. 17 Měření elektromotoru v hlukové komoře



*Obr. 18 Mikrofon B&k 4942*

Z výsledků obou provedených hlukových zkoušek, které byly provedeny za ustálených podmínek celkově jednou, vyplývá, že oba elektromotory s rozdílnými ložisky splňují požadované hodnoty normy ČSN EN 60034-9.

## 2.5 Provedení životností zkoušky

Životnostní zkouška ložisek bude provedena na dvou vzorcích elektromotorů od společnosti Siemens řady 1LE osově výšky 100 mm, kdy elektromotory budou osazeny dvěma různými ložisky od dvou různých výrobců SKF a ORS. Ložiska z rozdílného cenového spektra jsou nabízena na našem trhu. Životností zkouška byla provedena ve společnosti Siemens elektromotory o. z. Mohelnice. Při zkoušce bude elektromotor připevněn na kovový stůl, na kterém jsou vyfrézovány T-drážky, díky kterým můžeme elektromotor pevně připevnit ke stolu za pomoci 4 kusů upínek. Po připevnění elektromotoru ke stolu bude připojen do sítě 400V/50Hz. Na elektromotor bude připevněn unašeč, ve kterém jsou umístěna kuličková ložiska od společnosti INA. Unašeč volně nasadíme na volný konec hřídele a připevníme jej za pomoci šroubu s podložkou k hřídeli elektromotoru, ve které je závit M10. Na unašeči bude zavěšeno pomocí ocelového lana závaží, které bude působit na



volný konec hřídele radiální silou o velikosti  $F_Q = 870\text{N}$ , což představuje hmotnost závaží 87 kg. Režim chodu elektromotoru během životnostní zkoušky bude 26s běh a 0,2s stop, kdy dojde k zastavení chodu elektromotoru a k jeho reverzaci na opačné otáčky. To zajistíme pomocí reverzního stykače, který mění smysl otáčení. Dle předpisu by měla být zkouška prováděna po dobu 10 000 hodin a po každých 2000 hodinách by měl být elektromotor vypnut a vizuálně zkontrolován.



*Obr. 19 Unašeč*



*Obr. 20 Provedení životnostní zkoušky*

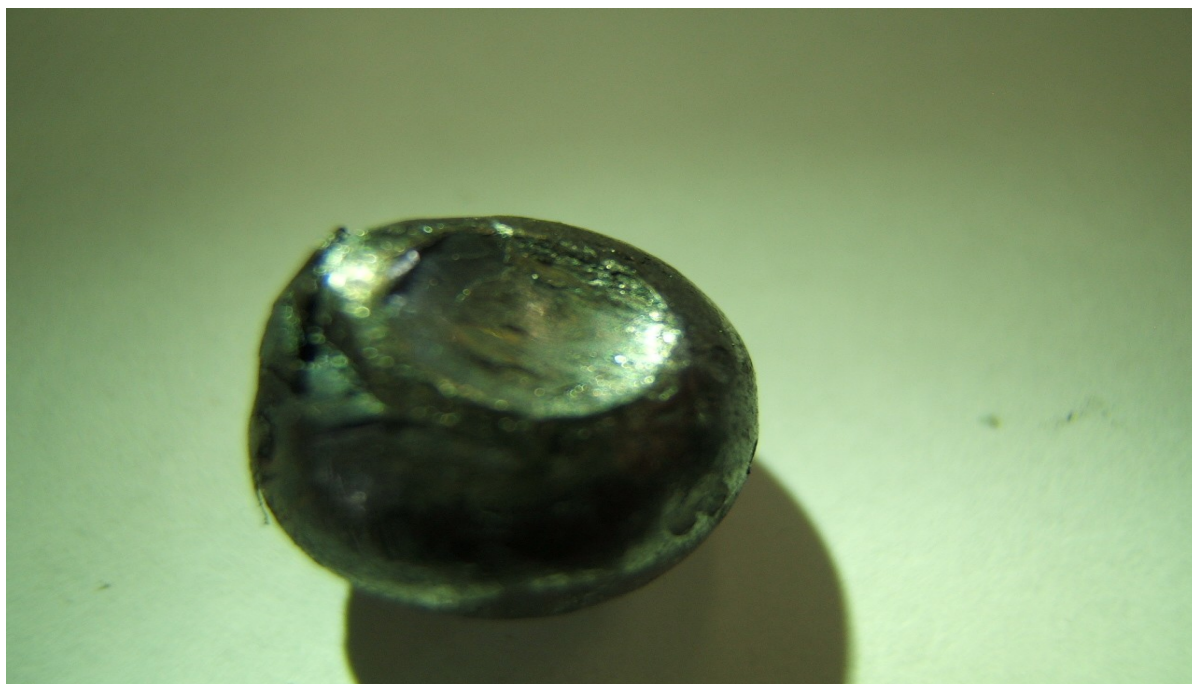
### 3. Zhodnocení stavu valivých ložisek

V této práci, která se zabývala testováním životnosti ložisek dvou různých výrobců SKF a ORS, byla ložiska podrobena třem různým zkouškám, z nichž poslední měla prokázat trvanlivost ložisek při extrémním zatížení celého zařízení, které probíhalo po dobu 4000 hodin v době od 5.10. 2011 do 2.3. 2012, kdy došlo ke konci technického života ložiska od společnosti ORS vlivem ztráty veškerého maziva. Ztráta maziva byla způsobena pravděpodobně zvyšující se vnitřní teplotou, což bylo pravděpodobně způsobeno takzvaným pittingem. Únavové odlupování materiálu z valivých ploch ložiska tzv. pitting. Pitting nám zvyšuje především chvění, teplotu a třecí moment v ložisku. Pitting má rychlý postup na plochách, kde je realizován bodový kontakt, při styku čárovém však nese dále plocha okolní. Pokud se dostanou vydrolené částice do valivého kontaktu tak dochází k poškození valivé plochy, čímž dojde k vymezení vůle a tak může dojít k zadření ložiska. Intenzivní oěr valivých ploch nám oddaluje vznik samotného pittingu z důvodu že neustále odstraňuje povrchové vrstvy, které vznikly při odvalování kuliček. Mazivo, které vniká do povrchových trhlin, působí v povrchových trhlinách při průchodu valivého tělesa velkým hydrostatickým tlakem, čímž se nám thliny zvětšují. Výběr vhodného maziva má příznivý vliv na snížení teploty, zmenšení tření a oěru. Druhé ložisko od společnosti SKF bylo po demontáži v naprostém pořádku a mohlo by ve svém technickém životě pokračovat dále bez jakýchkoliv omezení, jelikož se u něj nezvyšovala hlučnost ani vibrace. [1]



*Obr. 21 Poškození vnitřního kroužku vlivem pittingu*





*Obr. 22 Poškození kuličky ložiska ORS*



*Obr. 23 Krycí plech ložiska*

### 3.1 Zhodnocení ceny ložisek

#### 1. SKF

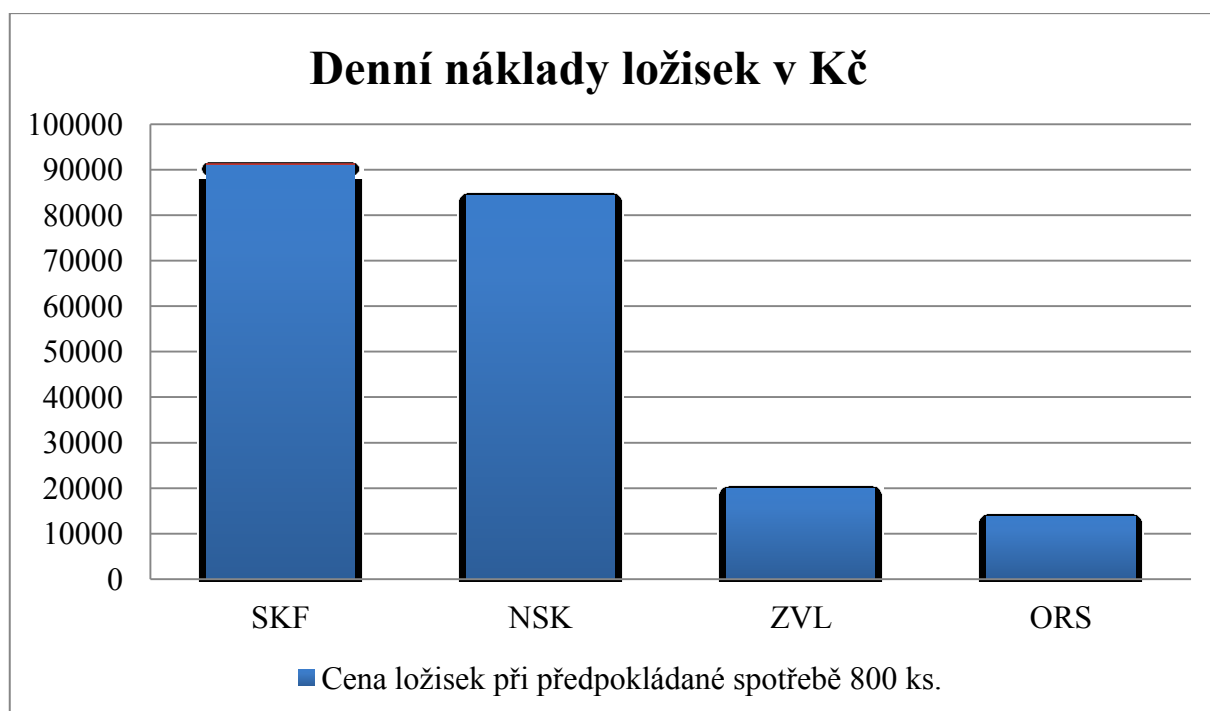
SKF ložiska jsou vhodná pro použití v elektromotorech, které jsou více namáhány při provozu motoru po dobu 5000 hodin za rok, předpokládaná životnost ložiska SKF je 30000 hodin bez nutnosti jeho výměny, kdy je pouze nutné po uplynutí předpokládané životnosti zkontrolovat vibrace a hlučnost ložiska v elektromotoru. Pokud budou tyto hodnoty překročeny, je nutná výměna ložiska. Tato ložiska se využívají v elektromotorech, které jsou použity například na menších drtičkách v kamenolomech. Jako vhodnou kvalitativní náhradu za ložiska SKF se mohou použít ložiska od společnosti NSK, která jsou považována za největšího konkurenta společnosti SKF a zároveň druhého největšího výrobce ložisek na světě. Při denní spotřebě 800 kusů ložisek SKF je předpokládaná velkoobchodní cena bez DPH 114 Kč za kus, což je 91200 Kč za den, pokud bychom chtěli použít jako alternativu ložisek SKF ložiska NSK, je jejich předpokládaná velkoobchodní cena 105,30 Kč za kus bez DPH, což je 84240 Kč. I když je ekonomicky výhodnější použití ložisek NSK z důvodu nižší ceny, přesto používáme ložiska SKF, protože hlavní těžiště odbytu je německý trh, kde jsou od zákazníků vyžadována ložiska SKF.

#### 2. ZVL

Ložiska ZVL je vhodné používat do elektromotorů, které nejsou příliš namáhány, kdy jejich předpokládaný roční cyklus je 3000 hodin a jejich předpokládaná životnost je 4 roky, kdy je nutná jejich kontrola popřípadě již výměna za nové ložisko. Použití ložisek ZVL je vhodné například do čerpadel. Při denní spotřebě 800 kusů ložisek ZVL je předpokládaná velkoobchodní cena bez DPH 24,80 Kč za kus, což je 19840 Kč za den.

#### 3. ORS

Jako nejlevnější vhodnou alternativou ke kvalitnějším ložiskům je možné použití ložisek od společnosti ORS, která jsou vhodnější pro použití při menších zatíženích například pro použití v domácnostech na pily, štípače a jiné další použití. Při denní spotřebě 800 kusů ložisek ORS je předpokládaná velkoobchodní cena bez DPH 17,08 Kč za kus, což je 13664 Kč za den.



*Obr. 24 Denní náklady ložisek v Kč*

## Závěr bakalářské práce

Bakalářská práce se zabývala problematikou životnosti ložisek na elektromotorech, kdy veškeré zkoušky probíhaly ve společnosti Siemens elektromotory o.z. Mohelnice na dvou vzorcích elektromotorů řady 1LE osově výšky 100mm. Ložiska pro experimentální měření byla vybrána z rozdílného cenového spektra, a to ložiska od společnosti SKF A.B. a ORS – Ortadogu Rulman Sanayi ve Tic.A.S, jejichž cena je bez DPH u SKF 114,00 Kč a u ORS 17,08 Kč. U těchto dvou ložisek jsme se snažili prokázat vhodnost použití levnějších ložisek, které jsme instalovali do dvou elektromotorů a podrobili je celkem třem zkouškám. Jako první zkouška byla provedena zkouška vibrační, druhou zkouškou byla zkouška hluková a poslední zkouška byla zkouška životnostní.

První provedenou zkouškou byla zkouška vibrační dle normy ČSN EN 60034-14, která předepisuje měření vibrací na 6 místech elektromotoru. Naše měření bylo provedeno na 5 místech z důvodu, že 6. měřené místo je na místě ventilátoru, který bychom museli demontovat. Ventilátor nebyl demontován, jelikož je součástí elektromotoru a vibrace by mohly být příliš zkresleny. Měřicí čidla B&K 2525 byla k elektromotoru připevněna pomocí včelího vosku proto, aby nedošlo k porušení povrchu elektromotoru a bylo možné dosahovat rezonancí na kmitočtech až 20 kHz. Měření jsme prováděli dle normy na pružné podložce a elektromotor byl měřen bez zátěže. Výsledky měření odpovídaly hodnotám normy ČSN EN 60034-14, kdy výsledky byly v průměru o 50% nižší než maximální hodnoty, které předepisuje norma. V tomto měření vyšla obě ložiska srovnatelně, i když o málo nižší hodnoty vibrací vykazoval elektromotor s ložisky od společnosti SKF.

Druhou provedenou zkouškou byla zkouška hluková dle normy ČSN EN ISO 3745, kdy měřenou hodnotou je hodnota akustického tlaku, ze které je poté vypočítána hodnota akustického výkonu. Měření bylo provedeno v hlukové komoře za pomoci 10 mikrofónů B&K 4942, které byly umístěny na takzvané polokouli, a zdroj hluku, v našem případě elektromotor, byl připevněn za pomoci šroubů doprostřed této polokoule a měření elektromotoru proběhlo bez zátěže. Před každým měřením proběhla kalibrace všech měřicích přístrojů a během měření byly udržovány stejné klimatické podmínky. Měření proběhlo na každé frekvenci po dobu 30s a to v rozsahu od 160 do 10000 Hz. Maximální hodnoty akustického výkonu jsou dle normy ČSN EN 60034-9 82 dB a naměřené hodnoty byly u ložisek SKF 71,06 dB a u ložisek ORS 74,87 dB. Z výsledků této zkoušky vyplývá, že





elektromotor osazený levnějšími ložisky plně splňuje hodnoty dané normou, ale opět i v tomto měření vyšla lépe ložiska SKF.

Poslední zkouškou, která byla provedena, byla zkouška životnostní. Tato zkouška byla provedena zavěšením závaží, které působilo na volný konec hřídele radiální silou  $F_Q=870$  N, což představuje hmotnost závaží 87 kg. Zkouška probíhala na životnostní zkušební společnosti Siemens v období od 5.10. 2011 do 2.3. 2012, což odpovídá přibližně 4000 hodinám, kdy došlo ke konci technického života ložiska od společnosti ORS způsobenému ztrátou veškerého maziva (pravděpodobně vlivem zvyšující se teploty) a poškozením valivých ploch vnitřního i vnějšího kroužku a kuliček ložiska následkem pittingu. Toto ložisko se již před koncem svého technického života projevovalo v elektromotoru zvýšenou hlučností a celkovými vibracemi. Ložisko od společnosti SKF bylo v naprostém pořádku a v elektromotoru se projevovalo nulovou hlučností a vibracemi a bylo by i nadále schopno pokračovat ve svém technickém životě. Z těchto důvodů je vhodné použití ložisek SKF ve velmi zatěžovaných elektromotorech, u kterých potřebujeme stálou a bezproblémovou funkčnost. Naopak ložiska ORS je vhodné použít v elektromotorech, které nejsou příliš zatěžovány. Obě ložiska při měřeních v elektromotorech prokázala svoji velmi nízkou hlučnost a minimální vibrace.



## Poděkování

Rád bych poděkoval za cenné rady a připomínky při zpracování práce Ing. et. Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. z katedry obrábění a montáže VŠB-TUO Ostrava a Květoslavu Osičkovi, Jiřímu Rajčulovi ze společnosti Siemens elektromotory o.z. Mohelnice.



## Seznam použité literatury

- [1] BOHÁČEK, František. *Části a mechanismy strojů II. Hřídele, tribologie, ložiska*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1987, 215 s.
- [2] Diagnostika valivých ložisek. *ADASH* [online]. 2012 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: [http://www.adash.cz/doc/ApplicationNotes/diag\\_val\\_lozisek\\_info\\_cz.pdf](http://www.adash.cz/doc/ApplicationNotes/diag_val_lozisek_info_cz.pdf)
- [3] Vibrodiagnostika. *LAMMB* [online]. 2005 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.lammb.cz/vibro.php>
- [4] New bearing doctor. *NSK* [online]. 2008 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctr/index.cgi?gr=dn&pno=E7005>
- [5] 5. Montáž a demontáž ložisek. *ZKL. ZKL GROUP* [online]. 2010 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/5-montaz-demontaz-lozisek>
- [6] Mazání ložisek. *Eriks* [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.eriks.cz/eriks.asp?pageid=2196>
- [7] Volba valivého ložiska. *MITCalc* [online]. 2011 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: [http://www.mitcalc.cz/doc/help/cz/c\\_bearing\\_choice.htm](http://www.mitcalc.cz/doc/help/cz/c_bearing_choice.htm)
- [8] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 128 s. ISBN 978-80-248-1860-3.
- [9] SIEMENS. *Technologický předpis pro montáž elektromotorů AH 56-180\*1LE 100-160: TP 511*. Mohelnice, 2005.
- [10] Návod na montáž a obsluhu asynchronních motorů s kotvou nakrátko. *PWMOTORS. PWM* [online]. 2003 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.pwm.cz/docs/manual-Helmke-CZ-v02.pdf>
- [11] Nízkonapěťové motory 1LE1. *SIEMENS. ELPRIM* [online]. 2007 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [http://www.elprim.cz/katalogy/1LE\\_cz.pdf](http://www.elprim.cz/katalogy/1LE_cz.pdf)
- [12] Kuličková ložiska. *SKF* [online]. 2005 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.skf.com/files/515051.pdf>



- [13] ORS. *ORS Bearings* [online]. 2006 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.ors.com.tr/>
- [14] Energeticky účinná ložiska. *SKF* [online]. 2008 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: [http://www.skf.com/portal/skf\\_cz/home/products?contentId=779107](http://www.skf.com/portal/skf_cz/home/products?contentId=779107)
- [15] ČSN EN 60034-14. *Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [16] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [17] ČSN EN ISO 3745. *Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [18] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [19] ČSN EN 60 034-9. *Točivé elektrické stroje - Část 9: Mezní hodnoty hluku*. Praha: Český normalizační institut, 1996.